

Degradación de la visibilidad en un sensor interferométrico de fibra óptica con un amplificador de fibra dopada con erbio

Visibility variations in interferometric fiber-optic sensors with EDFA's

M. A. Quintela, A. M. Cubillas, F. J. Madruga, M. Lómer y J. M. López-Higuera

Grupo de Ingeniería Fotónica, Escuela Técnico Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria, Avda. Los Castros, s/n, Santander. Email: quintelm@unican.es

RESUMEN:

Los resultados experimentales de las fluctuaciones de la polarización de la señal óptica en un amplificador de fibra dopada con erbio (AFDE) son presentados en este artículo. También, se ha analizado su influencia en la visibilidad de un sensor interferométrico de fibra óptica

Palabras clave: Interferómetro, visibilidad, polarización, fibra dopada con erbio, emisión espontánea amplificada, varianza del estado de polarización

ABSTRACT:

Experimental results on the polarization fluctuations of the optical signal in a erbium doped fiber amplifier (EDFA) are reported in this paper. Its influence on the visibility of interferometric optical fiber sensors is also analyzed.

Key words: Interferometer, visibility, polarization, erbium doped fiber, amplified spontaneous emission, variance.

REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] J. Jones, "Interferometry and polarimetry for Optical Sensing", Chap. 12 of *Handbook of Optical Fiber Sensing Technology*, Editor J. M. López-Higuera, Ed. Wiley & Sons (2002).
- [2] A. D. Kersey, M. J. Marrone, M. A. Davis, "Polarization-insensitive fibre optic Michelson interferometer", *Electronics Letters*, Vol. 27, No. 6, 518-519, (1991).
- [3] J. M. López-Higuera, Editor. *Handbook of Optical Fiber Sensing Technology*, Ed. Wiley & Sons (2002).
- [4] S. Abad, M. López-Amo, J. M. López-Higuera, D. Benito, A. Unanua, E. Achaerandio, "Single and double distributed optical amplifier fiber bus networks with wavelength division multiplexing for photonic sensors", *Optics Letters*, 24, (12), 805-807 (1999).
- [5] P. Nash, "Review of interferometric optical fiber hydrophone technology", *Inst. Elect. Eng. Proc.-Radar Sonar Navig.* 143, 204-209 (1996).
- [6] M. J. F. Digonnet, B. J. Vakoc, C.W. Hodgson, G.S. Kino, "Acoustic fiber sensor arrays", *Second European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS'04), Proceeding of SPIE.*, (2004), 39-50, edited by J.M. López-Higuera and B. Culshaw.

- [7] M. A. Quintela, C. Jauregui, F. J. Madruga, J.M. López-Higuera, "Experimental characterization of light polarization in active erbium doped fiber", *Microwave and Optical Technology Letter*, Vol.42, 395-397, (2004).
- [8] M. A. Quintela, C. Jauregui, O. M. Conde, A. M. Cubillas, J. M. López-Higuera, "Optical signal polarization state instability on erbium doped fibers", *Second European Workshop on Optical Fibre Sensors (EWOFS'04), Proceeding of SPIE.*, (2004) 544-547. edited by J.M. López-Higuera and B. Culshaw.
- [9] A. Simon, R. Ulrich, "Evolution and polarization along a single-mode fibre", *Appl. Phys. Lett.*, **31**, 517, (1977).
- [10] AU. Kersey, A.D. Marrone, M.J. Dandridge, A., "Observation of input-polarization-induced phase noise in interferometric fiber-optic sensors", *Optics-Letters* **13** (10): 847-849 (1988).

1.- Introducción

Las técnicas de sensado interferométricas han sido investigadas para un elevado campo de aplicaciones [1]. En estos sensores, las variaciones del estado de polarización (EdP) de los haces interferentes inducen variaciones de la visibilidad "en la salida, lo que puede provocar la atenuación en la señal interferométrica detectada. Diferentes técnicas se han desarrollado para reducir este efecto. Uno de los más populares es el uso del espejo rotador de Faraday para estabilizar el EdP a partir de la compensación de la birrefringencia de la fibra óptica [2].

En esta tecnología de sensado, los amplificadores de fibra dopada con erbio (AFDE) se pueden usar para aumentar la sensibilidad, mejorar la exactitud de las unidades de interrogación ópticas o compensar las pérdidas ópticas. Esto es especialmente importante en los sensores interferométricos con técnicas de multiplexado (multiplexación en el dominio del tiempo (TDM); multiplexación por división en longitud de onda (WDM)), donde el incremento del número de sensores se puede conseguir eficazmente con la incorporación de un AFDE [3-6].

El comportamiento de la polarización de la señal amplificada debe tenerse en cuenta cuando se emplea un AFDE para mejorar las características de un sensor interferométrico. En un AFDE, el EdP de la señal óptica amplificada varía aleatoriamente debido a la emisión espontánea amplificada (ASE) que se genera durante el proceso de amplificación. La influencia de los parámetros del AFDE, como la potencia de bombeo, la potencia de la señal de entrada y la longitud de onda de la señal en la estabilidad de la señal amplificada ha sido previamente estudiado, a partir de un concepto introducido por los autores: la varianza de la polarización [7, 8].

Estas variaciones aleatorias del EdP de la señal óptica amplificada son especialmente importantes en un array de sensores interferométricos multiplexados que emplean un bus amplificador de fibra. En estas topologías, los AFED's están localizados antes de cada sensor. Por esta razón, la señal de entrada del sensor interferométrico va a presentar variaciones aleatorias de la polarización.

En este artículo, se ha realizado un estudio experimental del comportamiento del EdP de la señal amplificada por un AFDE. Usando estos resultados, un análisis de la variación de la visibilidad debido a la polarización en sensores de fibra interferométricos excitados por una señal de baja potencia amplificada por un AFDE es también presentado.

2.- Resultados experimentales de la polarización en un AFDE

Las variaciones del estado de polarización de la señal amplificada se pueden cuantificar a partir de la varianza del EdP [7-8]. La varianza del EdP se define como la media de la varianza del azimut (σ_{AZI}^2) y la varianza de la elipticidad (σ_{ELLIP}^2) del EdP cambiante. Estos parámetros se definen de la siguiente manera:

$$\sigma_{AZI}^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \eta_{AZI})^2 \quad (1)$$

$$\sigma_{ELLIP}^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \eta_{ELLIP})^2 \quad (2)$$

donde N es el número de puntos medidos, x_i y y_i son respectivamente los valores del azimut y de la elipticidad del EdP para cada tiempo de medida (T_i), η_{AZI} y η_{ELLIP} son la media del azimut y de la elipticidad de los N EdP almacenados durante el experimento, respectivamente. En este trabajo, todas las medidas se han realizado con N=6000 durante periodos de 60 segundos.

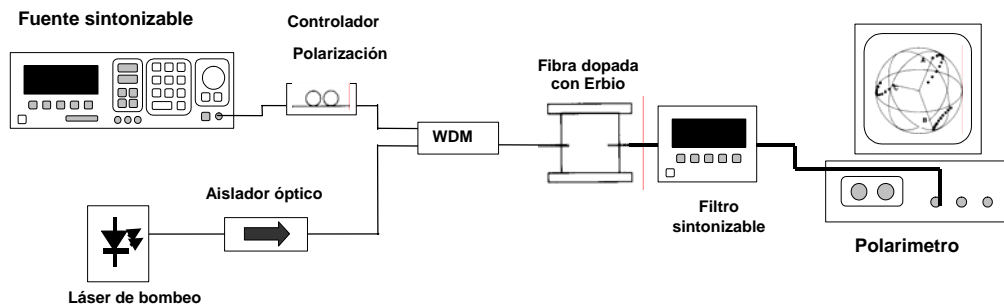


Figura 1. Montaje experimental para la evaluación de la polarización en una FDE.

Con el fin de caracterizar experimentalmente la evolución del EdP de la señal óptica amplificada en un AFDE, se implementó el montaje que se muestra en la figura 1. Como se puede observar en la figura, este montaje consta de una fuente óptica y un controlador de polarización para fijar un EdP específico de la señal de entrada. La longitud de onda de la señal fue 1550 nm. Un multiplexor de división de longitud de onda (WDM) se emplea para introducir simultáneamente la señal óptica y la señal de bombeo en la fibra dopada con Erblio (FDE). La FDE usada tenía 26 m de longitud con un pico de absorción de 5 dB/m en 1535 nm. Un láser a 1480 nm con un aislador óptico se ha utilizado como fuente de bombeo. El extremo final de la FDE ha sido conectado a un analizador de polarización óptico (HP-8509B) a través de un filtro sintonizable paso banda con el fin de reducir el ASE.

Se ha llevado a cabo medidas experimentales de la evolución del EdP para diferentes valores de la potencia de la señal de entrada y de la potencia de bombeo. Las figuras 2(a) y 2(b) muestran estos resultados experimentales. A partir de la figura 2(a), se puede observar las fluctuaciones aleatorias del EdP de la señal óptica de salida en la esfera de Poincaré para una potencia de bombeo de 20 dBm y una potencia de la señal de entrada de -18 dBm. Estas variaciones del EdP quedan cuantificadas a partir la varianza del EdP ($\sigma_{PS}^2 = 23 \cdot 10^{-4}$).

Estas fluctuaciones son debidas a que en el proceso de amplificación algunos fotones son emitidos espontáneamente con una fase aleatoria, una dirección aleatoria y un EdP aleatorio. Como esta emisión espontánea viaja a lo largo de la FDE, se puede replicar a través del proceso de emisión estimulada, de igual manera que la señal de entrada.

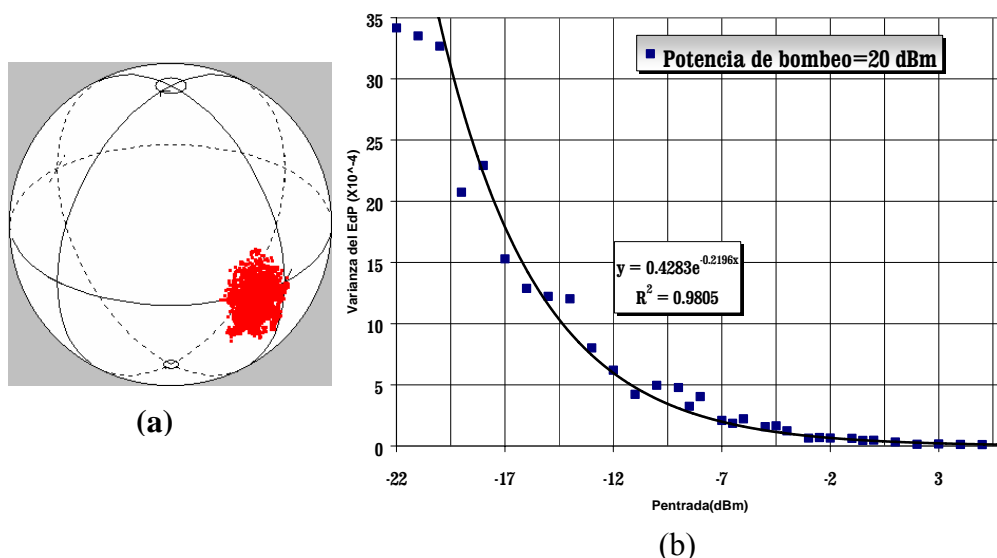


Figure 2: (a) Variaciones aleatorias del EdP de la señal óptica amplificada para una potencia de bombeo de 20 dBm y una potencia de la señal de entrada de -18 dBm. (b) Varianza de EdP en función de la potencia de la señal de entrada para una potencia de bombeo de 20 dBm.

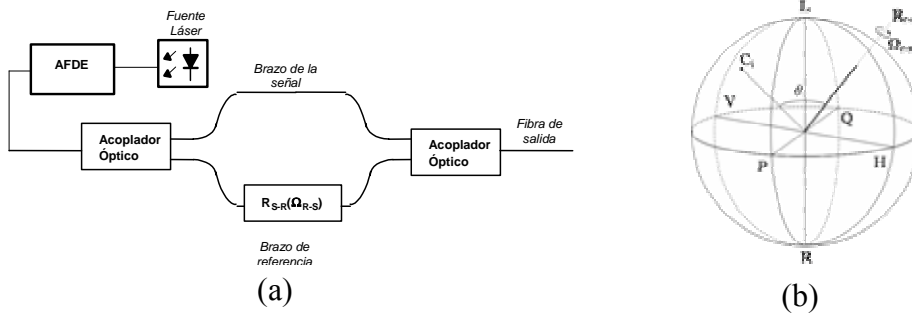


Figura 3. (a) Red birrefringente equivalente de un interferómetro en fibra Mach-Zehnder .
(b) Representación en la esfera de Poincaré de un retardador diferencial elíptico $R_{S-R}(\Omega_{R-S})$.

En consecuencia, potencias de entrada menores inducen una mayor varianza del EdP [7]. En la figura 2(b) σ_{PS}^2 se ha representado en función de la potencia de la señal de entrada para una potencia de bombeo de 20 dBm. A partir de esta figura, se puede deducir que el crecimiento de σ_{PS}^2 con la disminución de la potencia de la señal de entrada presenta un comportamiento casi exponencial, con un error cuadrático medio de 0.9805.

3.- Cambios en la visibilidad de un interferómetro.

Para analizar la influencia de σ_{PS}^2 de la señal óptica amplificada en la variación de la visibilidad de la señal interferente se empleó un interferómetro Mach-Zehnder típico. Las señales de entrada del sensor interferométrico se consideran de poca potencia, por lo que son amplificadas con un AFDE.

Las figuras 3(a) y 3(b) muestran, respectivamente, el esquema del interferómetro Mach-Zehnder y la representación en la esfera de Poincaré del EdP de la señal óptica en la entrada del primer acoplador. Para su comprensión hay que tener en cuenta que la birrefringencia en una longitud de la fibra se puede describir de manera genérica a partir de un retardador elíptico R_j [9] con un retraso de fase de (Ω_j) en la esfera de Poincaré. De esta manera, se puede observar en la figuras 3(a) y 3(b) que todas las dependencias de la polarización de un interferómetro se puede describir a partir de un retardador diferencial elíptico $R_{S-R}(\Omega_{R-S})$. Si se asume que ambos acopladores son insensibles a la polarización, la visibilidad viene dada por la siguiente expresión

$$V = [1 - \sin^2 \theta \sin^2(\Omega_{R-S}/2)]^{1/2} \quad (3)$$

donde θ es el ángulo entre el EdP de la entrada y el vector del eje propio de R_{S-R} (figure 3(b)). Esta ecuación muestra que variaciones aleatorias del EdP, debidas al proceso de amplificación del AFDE, a la entrada de un interferómetro de fibra Mach-Zehnder

produce cambios en θ . Por esta razón, se inducen variaciones de la visibilidad. Empleando la ecuación (3), los cambios de la visibilidad (ΔV) debido a las fluctuaciones de θ son expresadas como

$$\Delta V = \left(\frac{\partial V}{\partial \theta} \right) \Delta \theta = \frac{-\sin(2\theta) \sin(\frac{1}{2}\Omega_{R-S})}{2 \left(1 - \sin^2(\theta) \sin^2(\frac{1}{2}\Omega_{R-S}) \right)^{1/2}} \Delta \theta \quad (4)$$

Se calculó el valor de ΔV en función de θ para varios valores de Ω_{R-S} y para un valor constante de $\Delta \theta$. Esto último implica que el valor de la varianza del EdP (σ_{PS}^2) se mantiene constante. Estos resultados se obtuvieron para una potencia de bombeo de 20 dBm y una potencia de la señal de entrada de -18 dBm. Los resultados se muestran en la figura 4.

A partir de la figura se puede deducir que ΔV depende del EdP a la entrada del interferómetro. Además, se observa que ΔV incrementa con Ω_{R-S} . El valor mínimo de ΔV se obtiene cuando la visibilidad es próxima a la unidad ($\theta=0$). Por otro lado, ΔV alcanza su valor máximo para diferentes EdP de entrada dependiendo del valor de Ω_{R-S} . Por ejemplo, $\Delta V_{\max}=0.5$ para $\Omega_{R-S}=5\pi/6$ y $\theta \approx \pi/3$, y $\Delta V_{\max}=0.2$ para $\Omega_{R-S}=\pi/2$ y $\theta \approx 2\pi/7$.

Para una potencia de bombeo de 20 dBm, y usando los valores de Ω_{R-S} y θ para los que ΔV es máxima en la figura 4, los cambios de visibilidad son calculados para diferentes potencias de la señal de entrada en un AFDE. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 5. Se puede observar que para cada valor de Ω_{R-S} ΔV crece cuando la potencia de la señal de entrada disminuye. La explicación de este comportamiento se encuentra en que la varianza del EdP (σ_{PS}^2) también incrementa cuando disminuye la

potencia de la señal de entrada, como se mostraba en la figura 2(b).

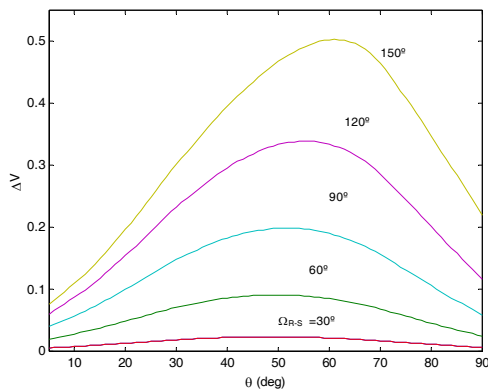


Figura 4. ΔV en función de θ para varios valores de Ω_{R-S} cuando la potencia de bombeo y la potencia de la señal de entrada son 20 dBm y -18 dBm, respectivamente.

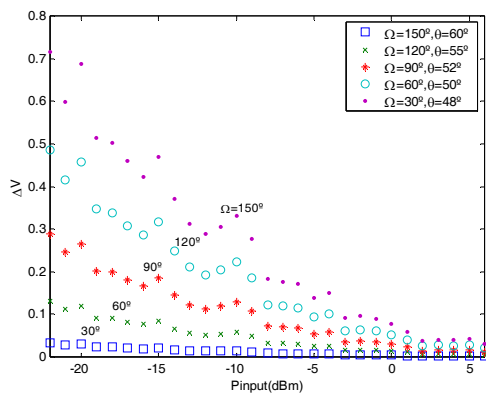


Figura 5. ΔV en función de la potencia de la señal de entrada cuando la potencia de bombeo es 20 dBm.

Conclusión

Los cambios de la polarización de la señal de salida de un AFDE para diferentes condiciones de trabajo han sido cuantificados experimentalmente a partir de la varianza del EdP. También, se ha analizado la variación de la visibilidad de un interferómetro Mach-Zehnder cuando la señal de entrada de baja potencia es amplificada por un AFDE. Las fluctuaciones aleatorias del EdP de la señal amplificada inducen variaciones aleatorias de la visibilidad, que va a depender a su vez del EdP de la entrada, de la birrefringencia de los brazos del interferómetro, de la potencia de bombeo y de la potencia de la señal de entrada.

Para reducir estas fluctuaciones de la visibilidad se requiere retrasos de fase (Ω_{R-S}) del interferómetro pequeños, valores mínimos de θ y/o que el AFDE trabaje en una región cercana a la saturación. Estos efectos también pueden degradar el comportamiento de un array de sensores interferométricos multiplexados, por lo que lo anteriormente mencionado debe tenerse en cuenta en el diseño de estas redes de sensores.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido cofinanciado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología a través de los proyectos SuGAROS (TIC'2001-0877-C02-01) and EOAMOP (TIC'2002-01259) R&D.